

STCF MUON探测器研究进展

李锋

代表STCF缪子探测器组

2025-07-04



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

- 概述
- 塑闪探测器
- RPC探测器
- 读出电子学
- ASIC芯片
- 小结

概述

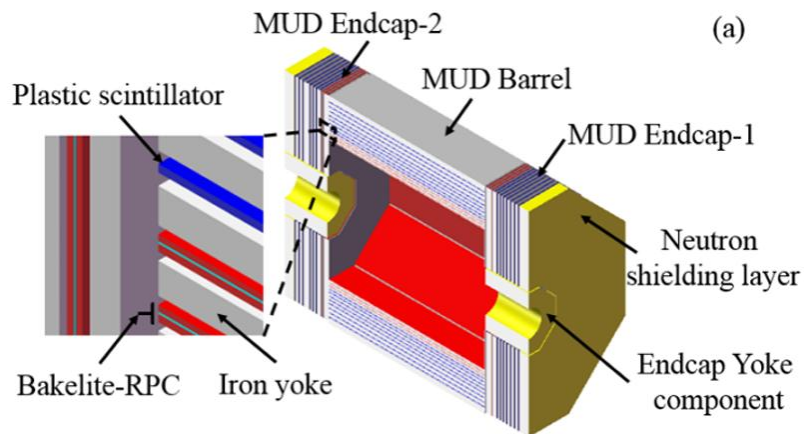
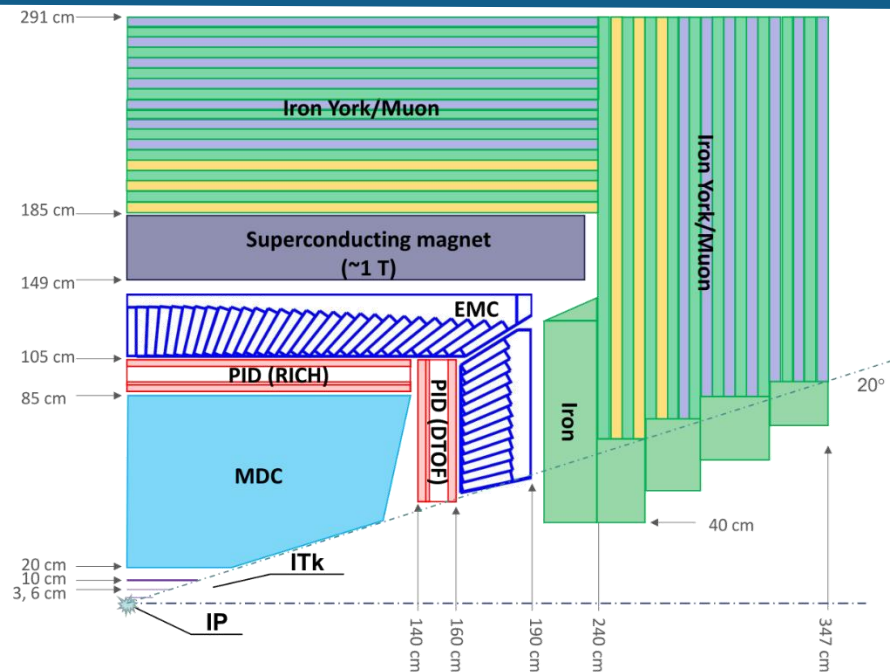
Z. Fang *et al* 2021 *JINST* 16 P09022

基准设计方案:

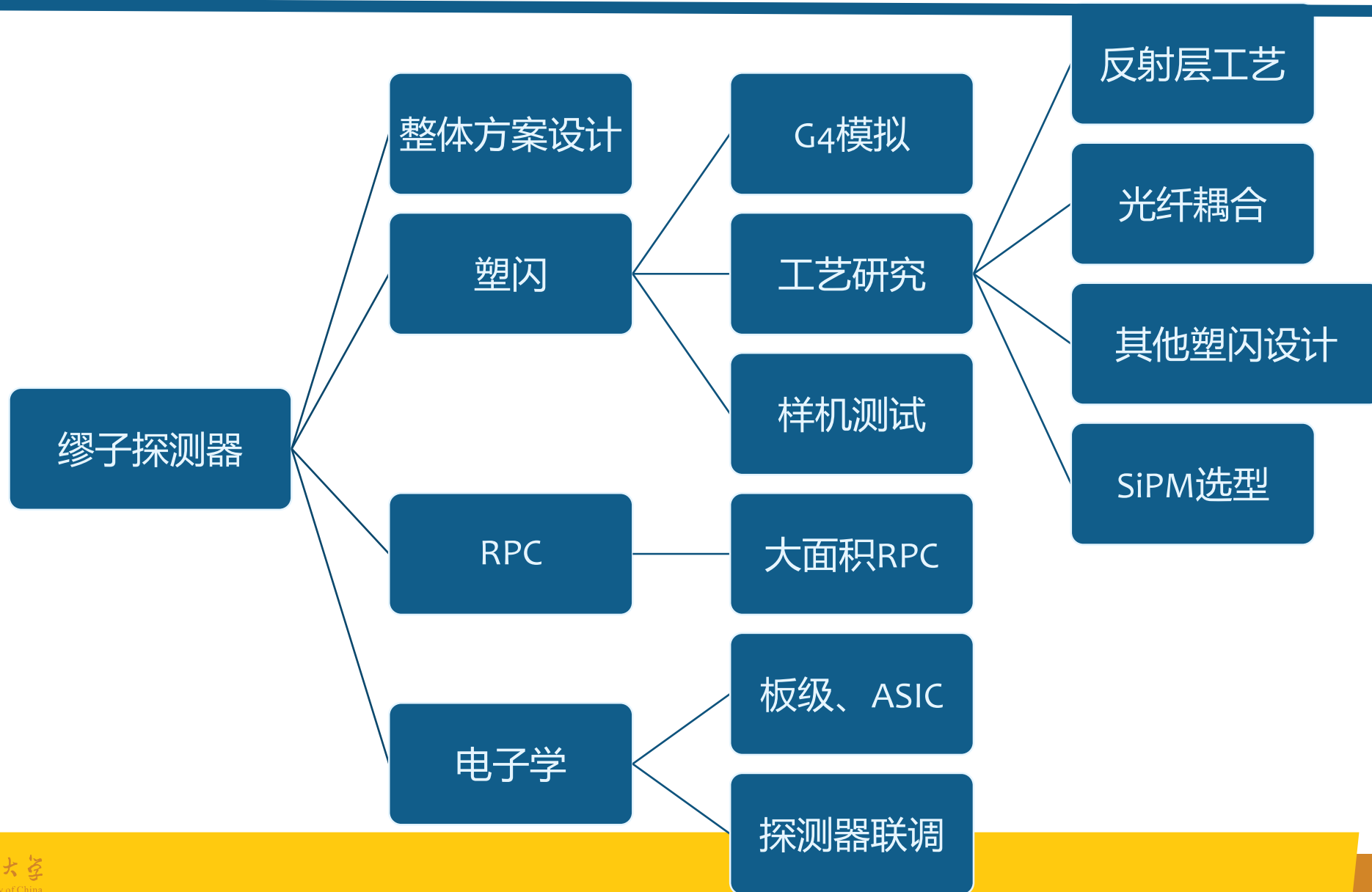
- RPC + 塑料闪烁体PS
- 内三层为RPC: 对本底不敏感
- 外七层为PS: 对强子探测、鉴别灵敏

性能指标:

- 探测效率达到95%
- π 误判为 μ 的概率<3%
- 探测系统时间精度<500ps
- 单通道事例率达到100kHz



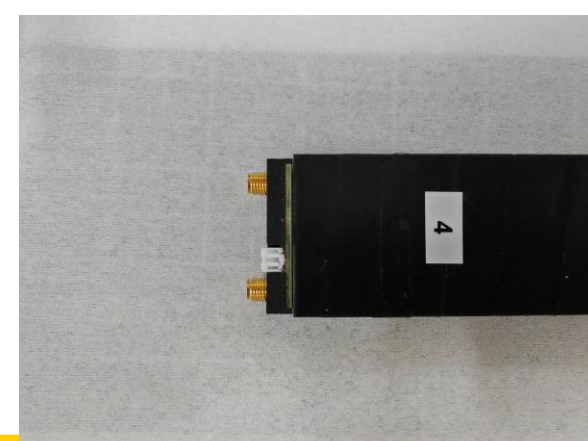
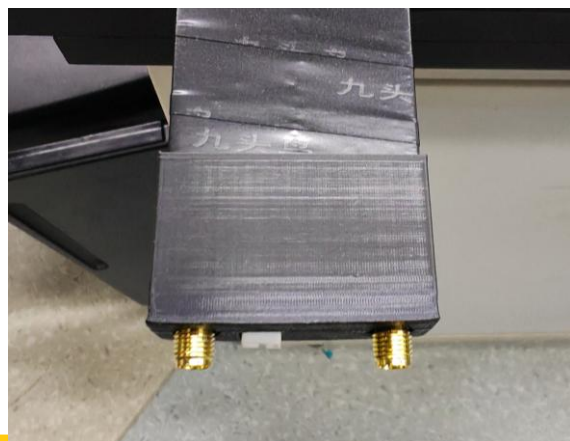
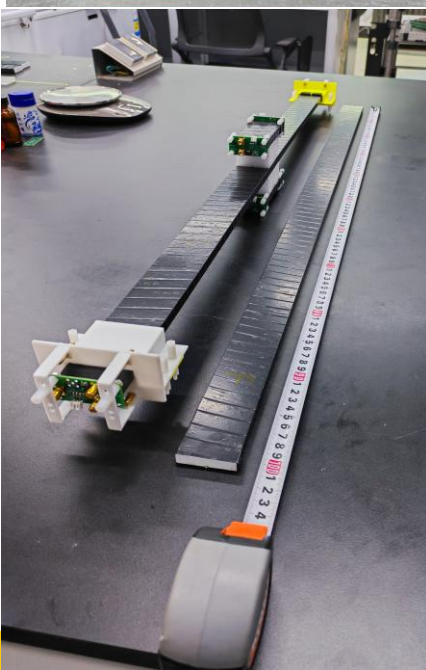
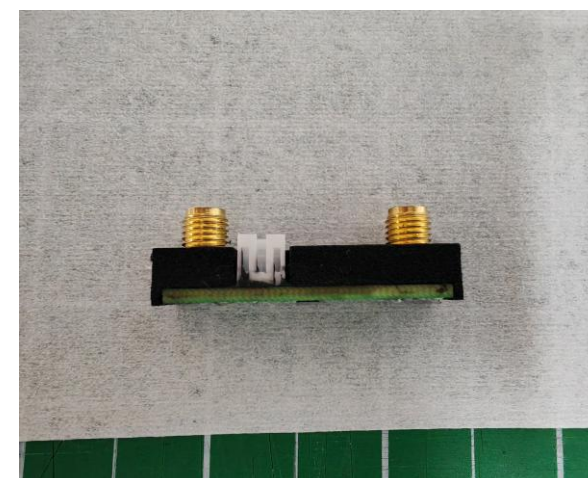
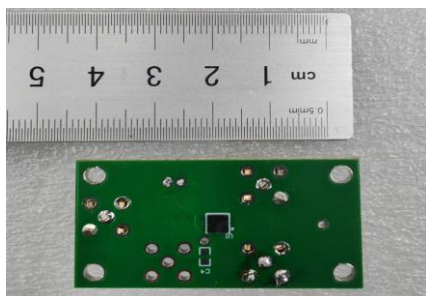
整体研究安排



塑闪探测器：夹具、SiPM适配板



- 优化迭代夹具、SiPM适配板等，配合机械支撑结构设计的优化
- 夹具更新到第4版，适配板更新3版



适配板40mm*10mm

适配板36mm*10mm

适配板36mm*10mm

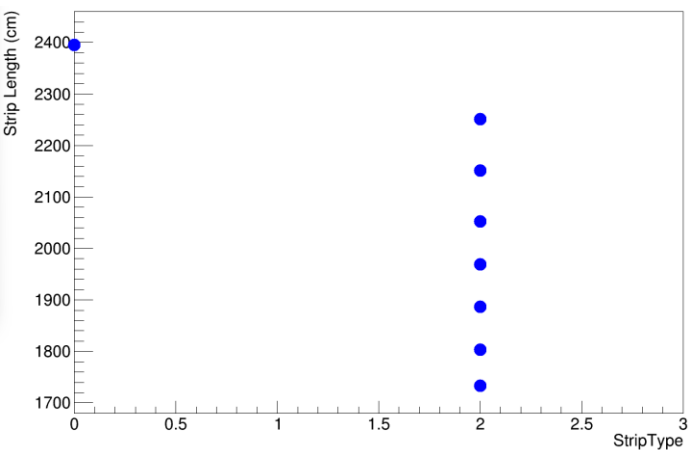
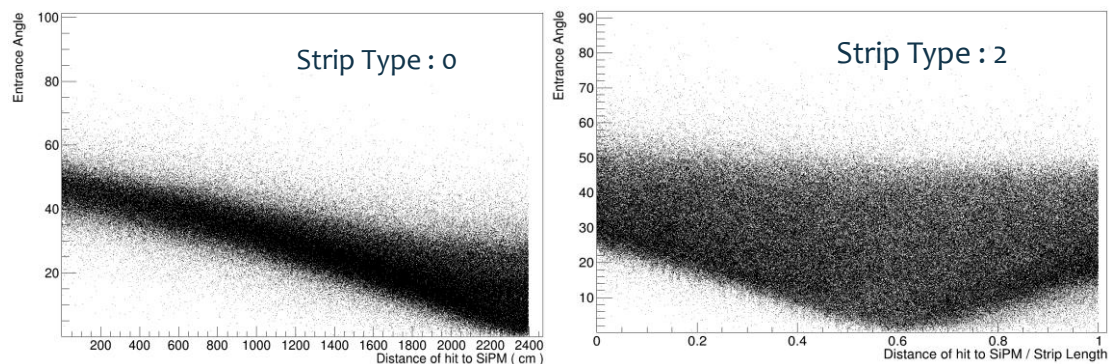
塑闪探测器：单元入射角研究



样机测试、方案研究中，指标性能的测定要与对撞机中情形一致

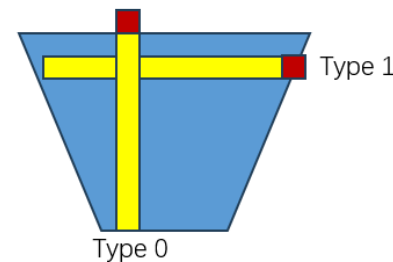
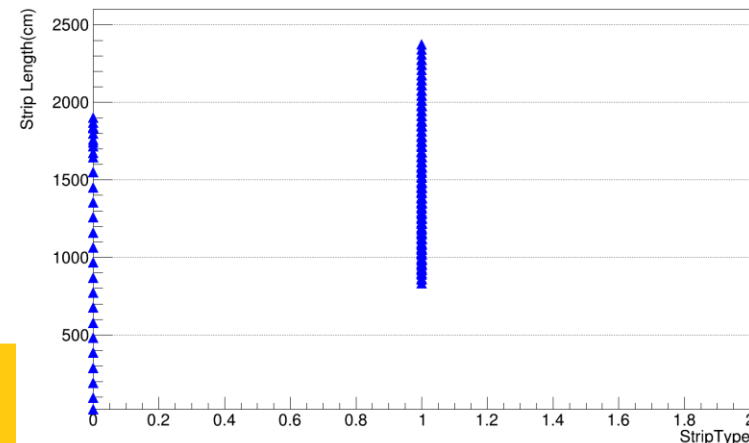
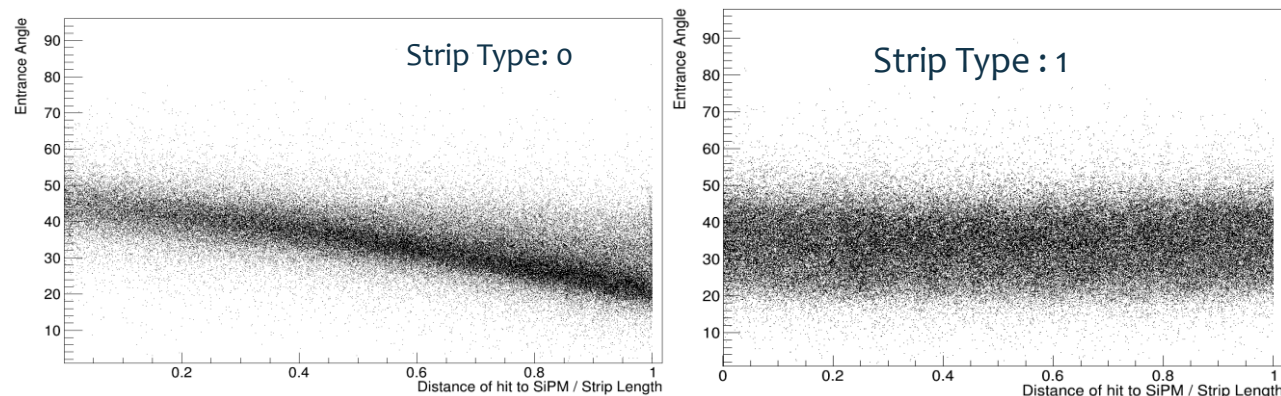
桶部

- Type0: 击中距离SiPM越远，越接近垂直入射
- Type2: 塑闪条中段有大量垂直入射事例



端盖:

- Type 0: 距离SiPM越远，更多事例入射角越小
- Type 1: 无明显增/减趋势

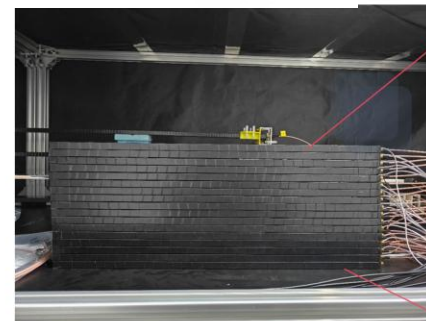
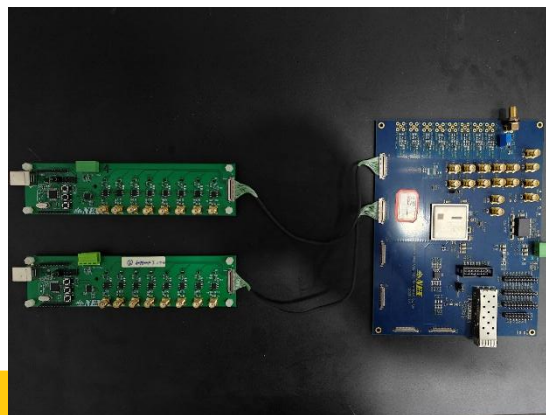
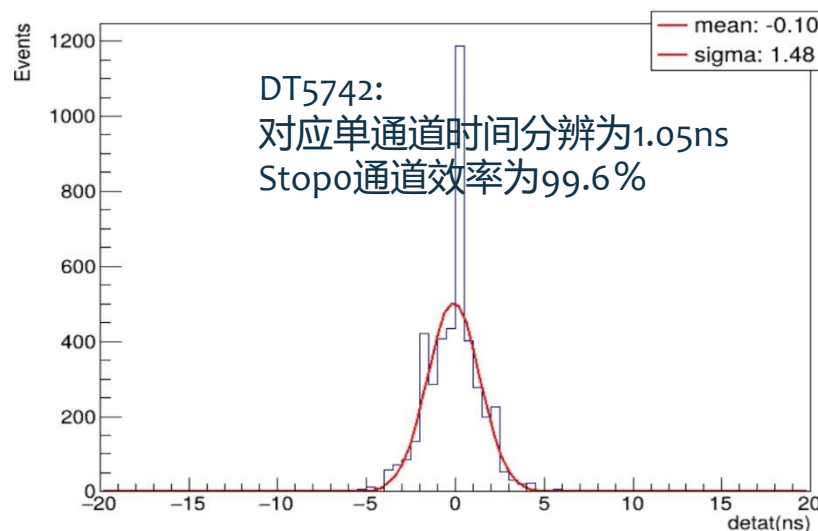
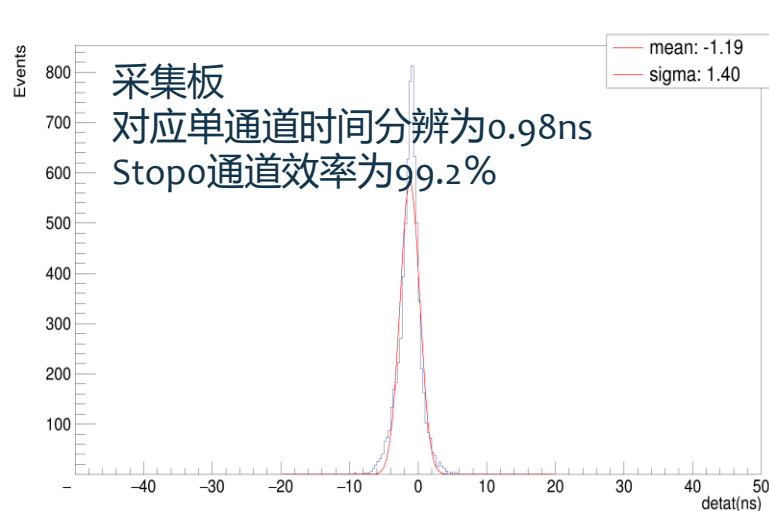


塑闪探测器：板级数据采集系统测试



多通道（16）数据采集板与塑闪联合测试，并与CAEN-DT5742商用器件结果一致

样品：4cm * 1cm * 50cm 塑闪条，内嵌光纤

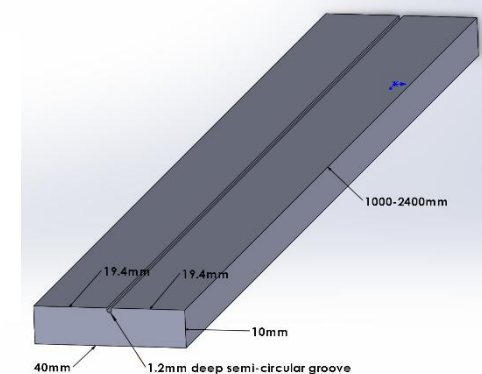
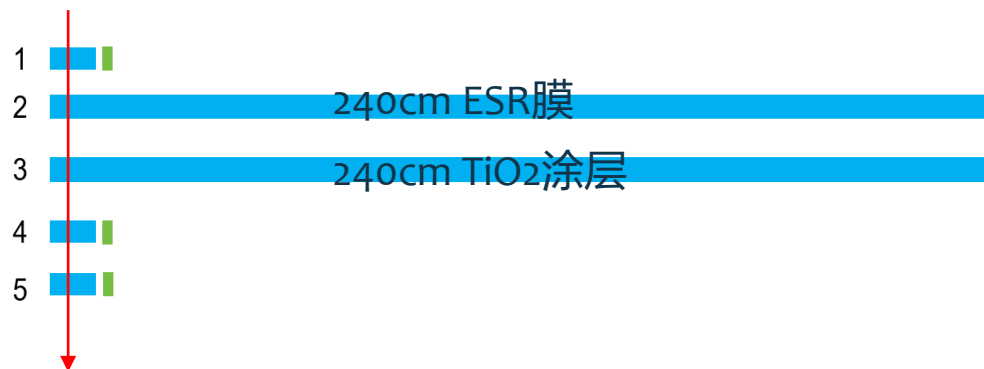


START
STOP0
STOP1
STOP2
STOP3
STOP4
STOP5
STOP6
STOP7
STOP8
STOP9
STOP10
...
STOP14
STOP15

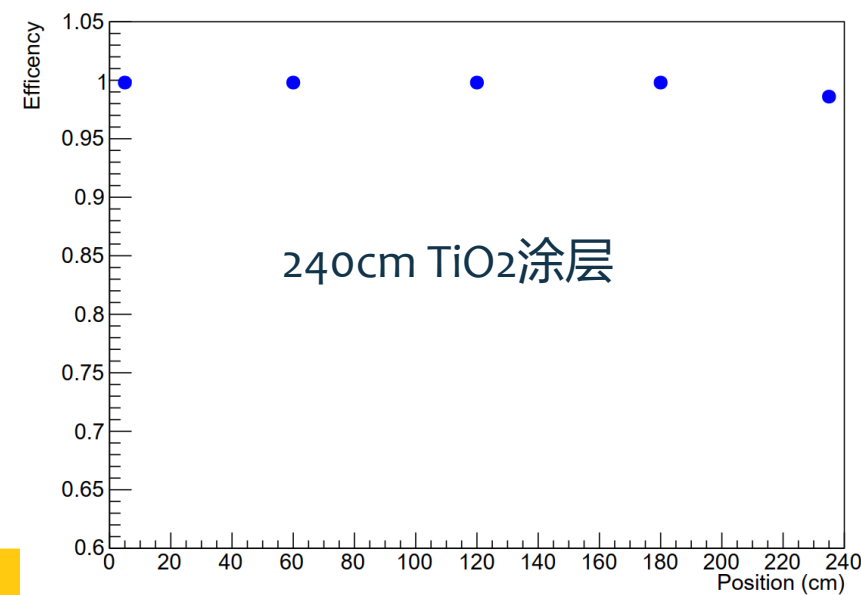
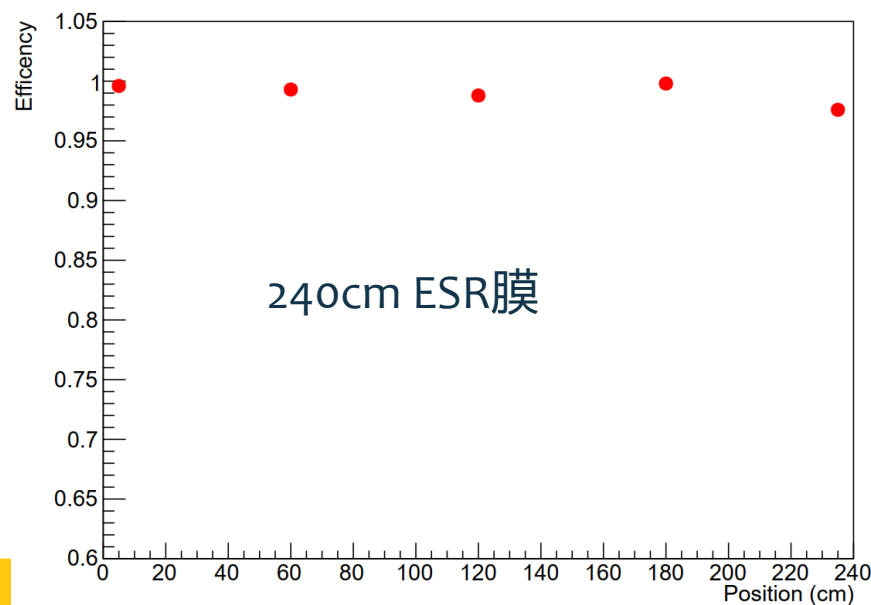
塑闪探测器：长塑闪单元



- 4cm * 1cm * 200cm (或240cm)
- 反射层：喷涂TiO₂
- 波长位移光纤：Kuraray Y-11, $\phi = 1\text{mm}$
- SiPM: sensl, J-30035, 3*3mm
- 单端读出



- 选择垂直入射缪子事例
- 使用DT5742采集波形
- 仔细研究误符合、噪声、阈值等
- 探测效率达标

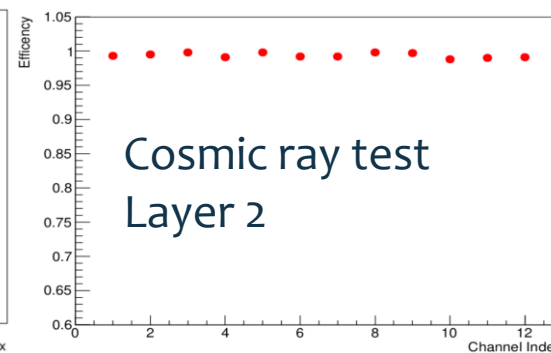
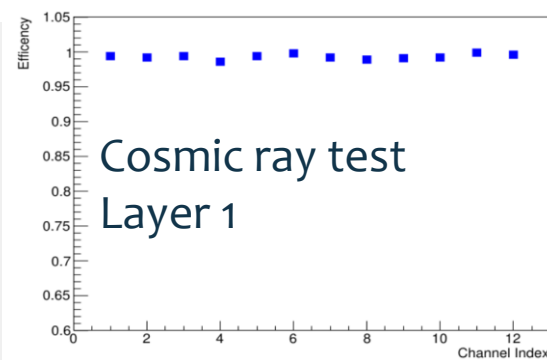
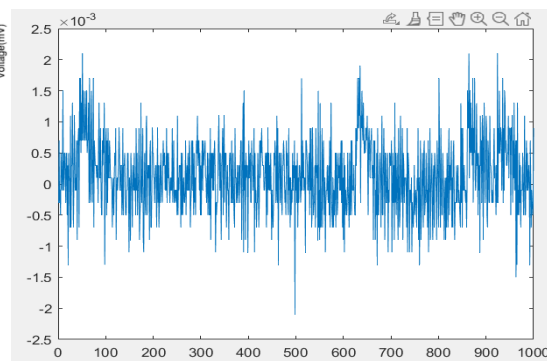
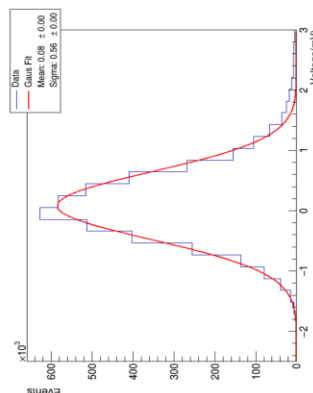
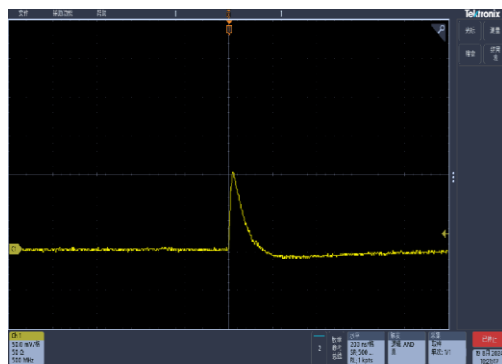


塑闪探测器：平板样机V1



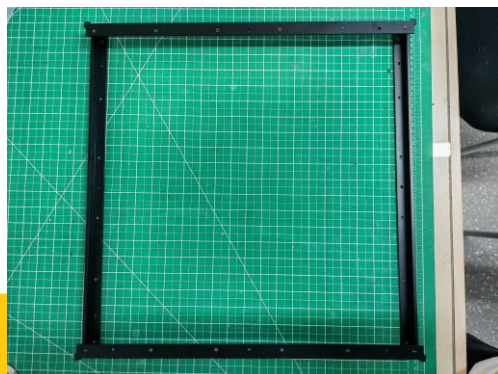
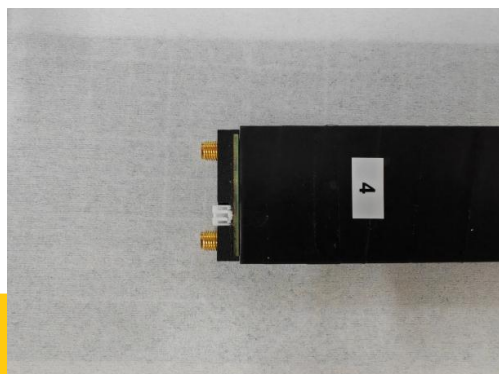
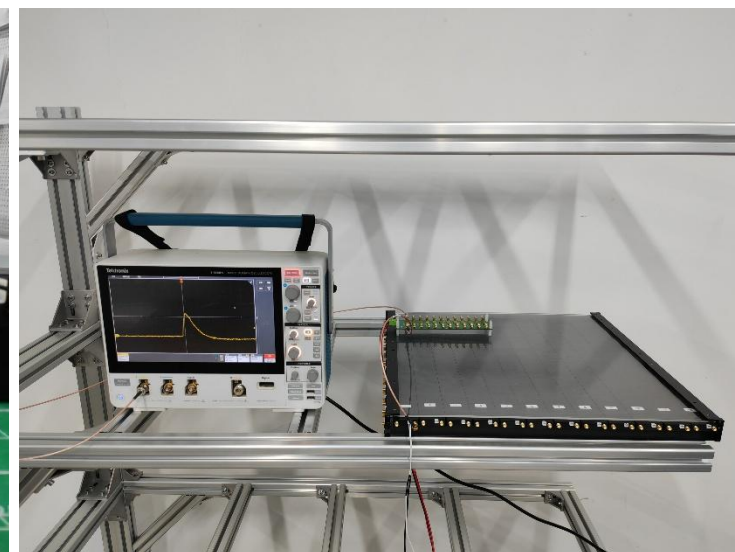
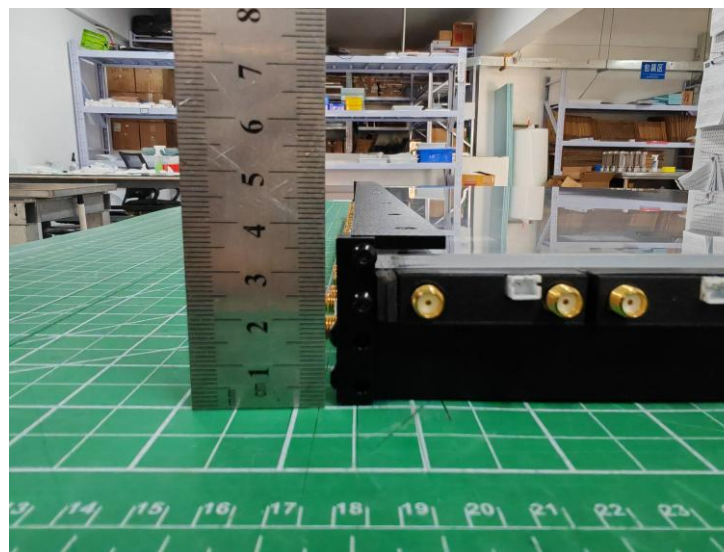
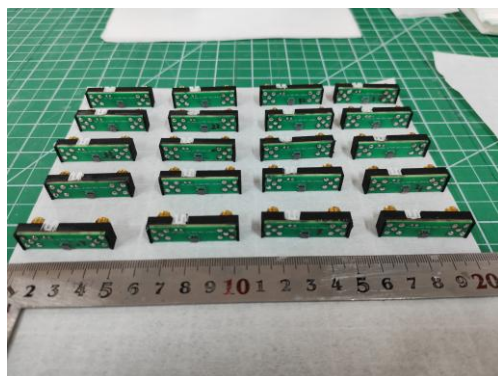
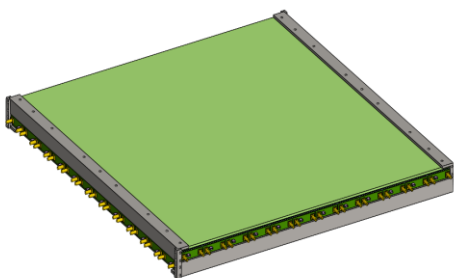
• 第一版平板样机：

- 塑闪单元尺寸：50*4*1cm
- 平板样机尺寸：53*51cm
- 2 层、单端读出



• 第二版平板样机：

- 开始考虑工程实际的约束条件
- 机械支撑结构、接口、器件等迭代优化
- 两层单端读出塑闪条，十字交叉



- 厚度37mm，小于轭铁间隙基准设计值 40mm
- 正在进一步优化，并扩展到大面积

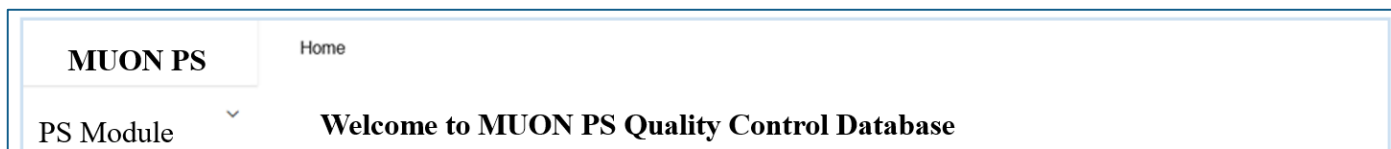
◆ QC 数据库雏形：

- 塑料闪烁体探单元：元器件较多
- 平板样机由多个单元拼接组成

◆ 使用网站数据库系统

◆ 交互界面，收集、展示、查询：

每一个单元、探测器模块用到的器件状态、负责人、组装时的状态记录等

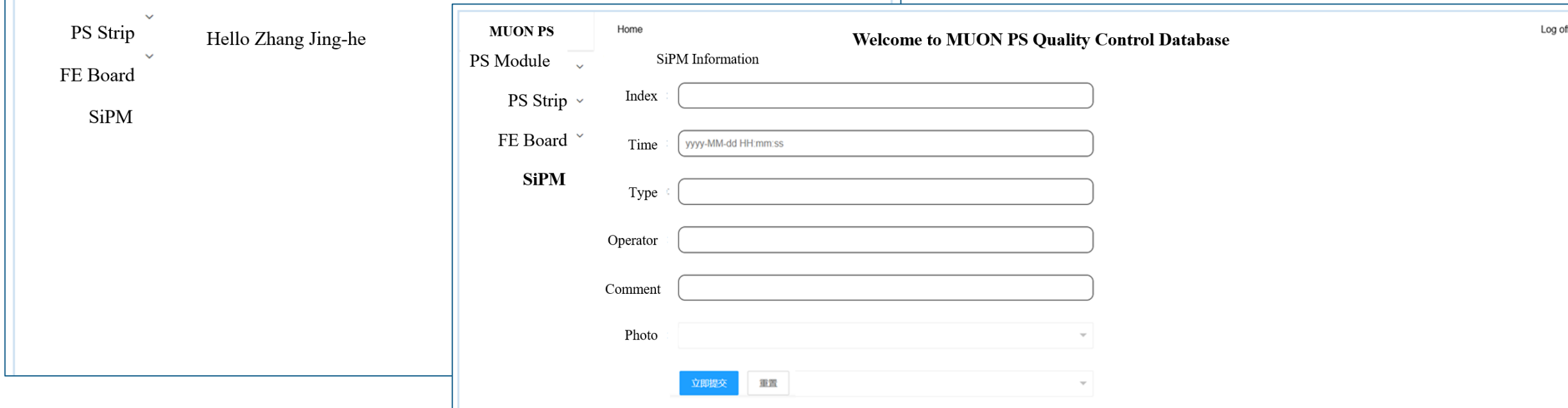


Home

MUON PS

PS Module

Welcome to MUON PS Quality Control Database



Home

MUON PS

PS Module

PS Strip

FE Board

SiPM

Welcome to MUON PS Quality Control Database

Log off

SiPM Information

Index :

Time :

Type :

Operator :

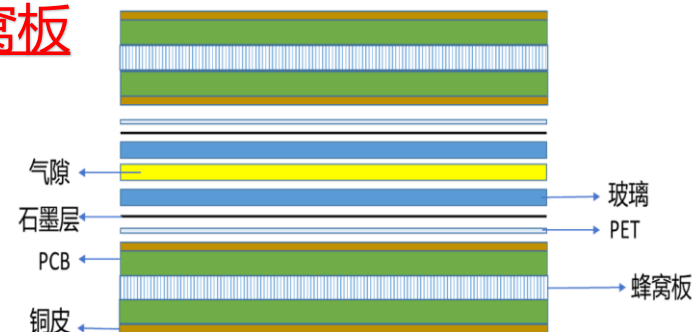
Comment :

Photo :

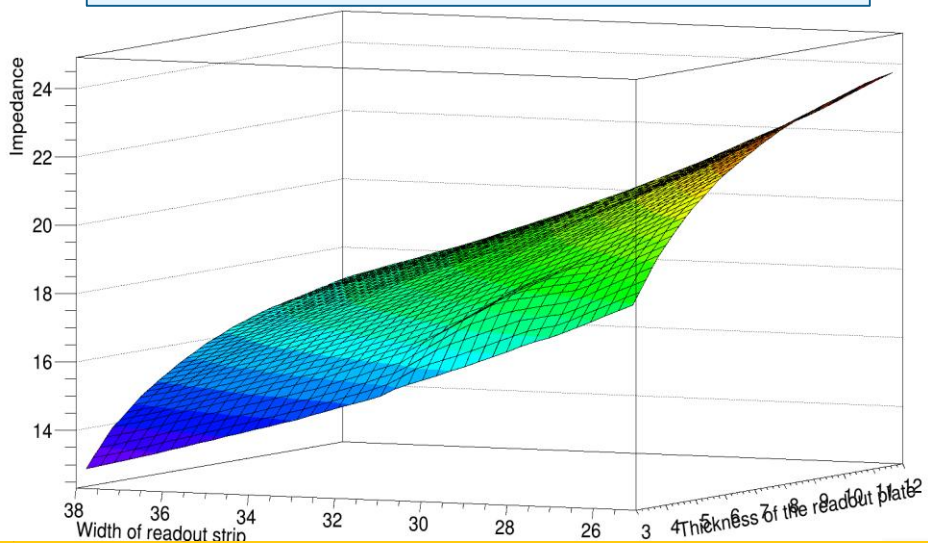
RPC——模拟研究

- 开展了探测器特性阻抗模拟研究，计算了不同条宽、不同板厚下的阻抗值
 - 读出条宽度由25mm增加到38mm
 - 上层蜂窝板厚度由3mm增加到12mm
- 开展了信号传输的模拟研究，模拟了信号的传输和串扰
 - 实现对不同输入波形进行传播仿真
 - 实现RPC参数可调，例：阻抗、读出条长度等

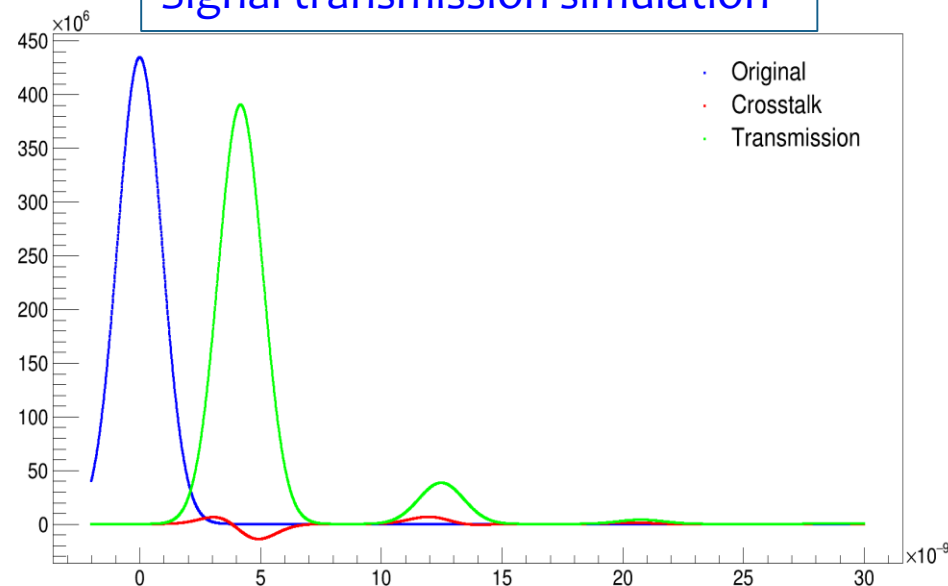
上层蜂窝板



Characteristic impedance simulation



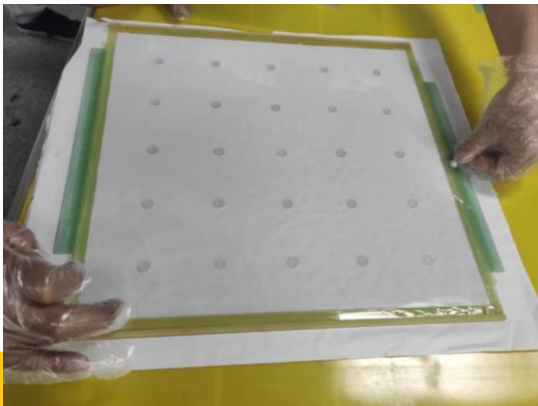
Signal transmission simulation



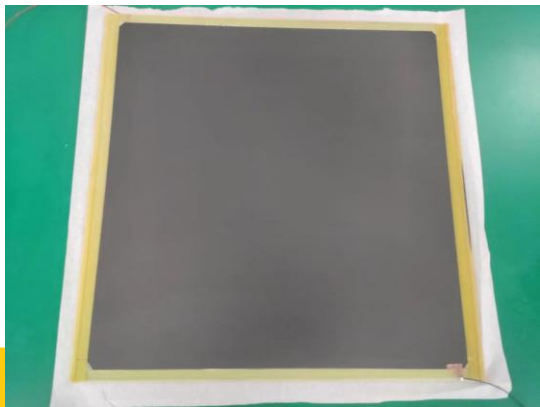
RPC: 原型探测器制作

- 研究不同气隙厚度的原型探测器
 - 采用自动设备进行垫片排布、点胶；边框涂胶操作
 - 气隙结构在大理石平台上抽真空固化
 - 喷涂石墨高压电极
 - 外层覆盖PET绝缘膜
 - 气密性测试：加压+3mbar，保压测试
- 1.2mm气隙厚度的原型探测器完成了高压锻炼
- 工作气体：氟利昂 94.7%、异丁烷 5%、六氟化硫 0.3%
- 高压下I-V曲线

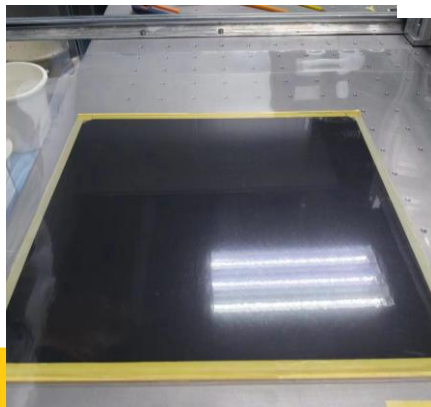
Gas gap with spacers



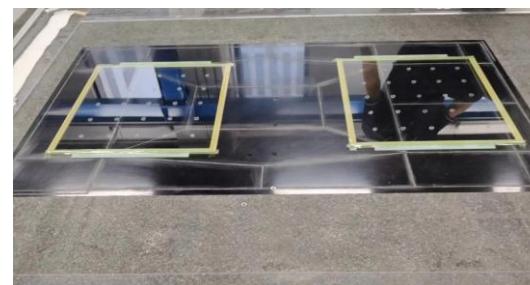
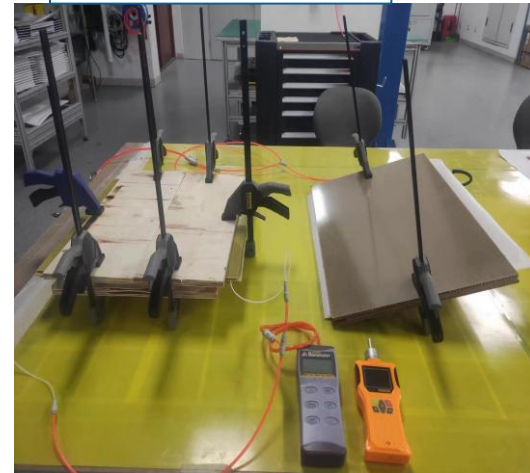
HV electrode painting



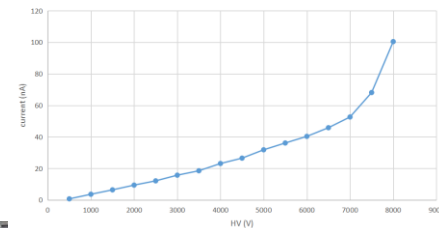
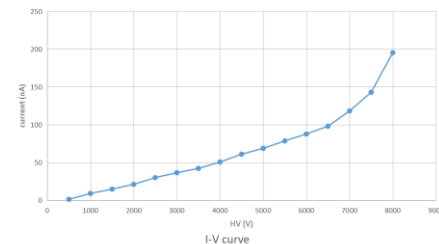
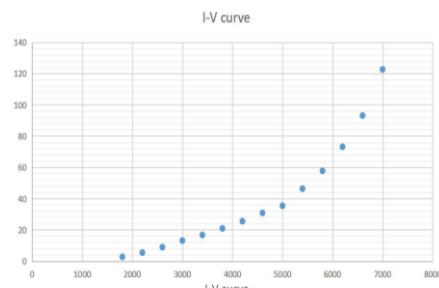
Finished gap



Gas-tight check



Curing in vacuum bag



研究低阻玻璃的电阻率变迁

- 低阻玻璃材料获取（非定制）

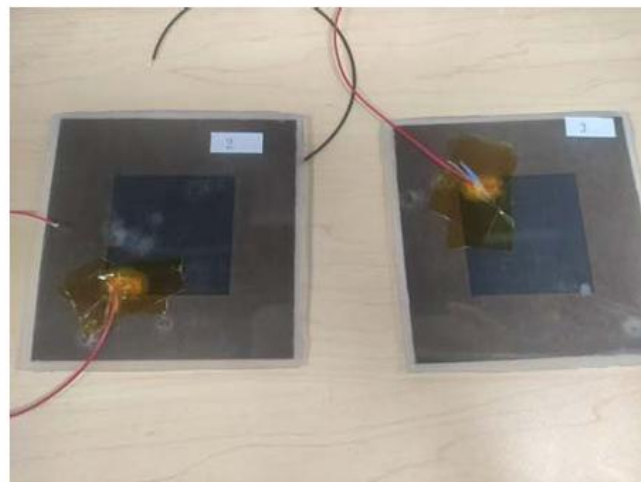
获取的浮法玻璃样品电阻率分布比较广泛

10E9- 10E11 $\rho/\Omega\cdot\text{cm}$ 区间体电阻率，预计能满足玻璃RPC高计数率指标

玻璃编号	厚度	R1	R2	$\rho/\Omega\cdot\text{cm}$
2-1 [#]	0.70mm	2.30G Ω	2.53G Ω	1.57E+12
2-2 [#]	0.72mm	32.30M Ω	32.36M Ω	2.04E+10
2-3 [#]	0.70mm	23.24M Ω	23.10M Ω	1.50E+10
2-4 [#]	0.52mm	0.90M Ω	0.92M Ω	7.94E+8
2-5 [#]	0.75mm	6.05G Ω	6.10G Ω	3.67E+12
2-6 [#]	0.62mm	1.81M Ω		1.32E+9

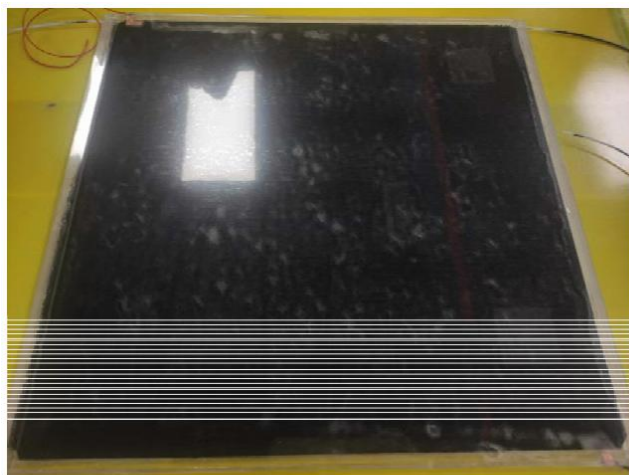
- 低阻玻璃材料的阻性稳定性测试

低阻玻璃小样品高压测试，研究长期电流积分后，是否有潜在的离子迁移，造成玻璃的体电阻率变迁。（期望阻性稳定不变）

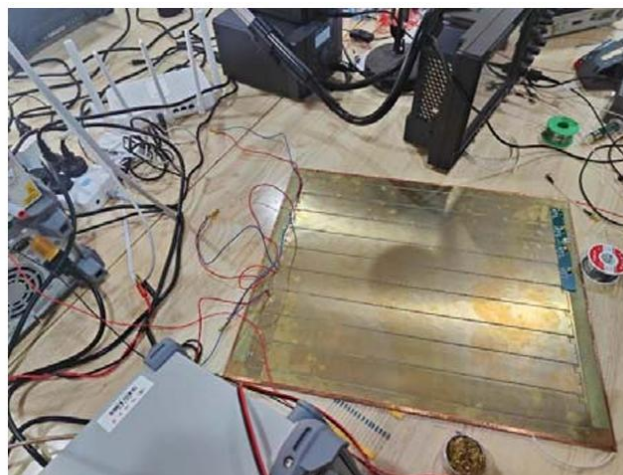


低阻玻璃电阻率变迁测试样品
两面石墨电极，导向引出电极，并封装保护

- 完成两个40cm*40cm低阻玻璃气室设计和制作
 - a) 电阻率 $1.27\text{E}+9 \Omega\cdot\text{cm}$
 - b) 电阻率 $1.50\text{E}+10\Omega\cdot\text{cm}$
- 完成气室闭气实验和高压老化实验



低阻玻璃气室
40cm X 40cm



RPC读出电极匹配前放



电子学联调

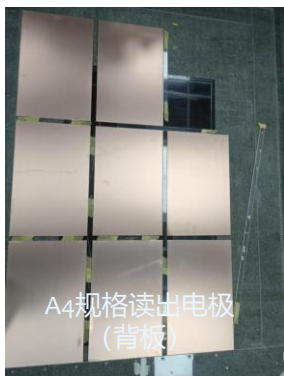
RPC：低阻玻璃RPC

- RPC尺寸系列化：
 - A4 (0.125平米) , A3 (0.25平米) , A2 (0.50平米)
 - 用较小面积RPC快速迭代；研发期间的探测器机械部件的备件互换。
 - 完成A4, A3 规格的读出条板设计和制作
 - 完成A4, A3规格的玻璃气室制作工艺验证
- 低阻玻璃RPC：
 - 完成了A4, A3规格的低阻玻璃气室制作
 - 高压训练，**未发现低阻玻璃替代电木引起的暗电流显著异常。**
- 低阻玻璃RPC模块的验证性测试
 - RPC感应信号直连示波器

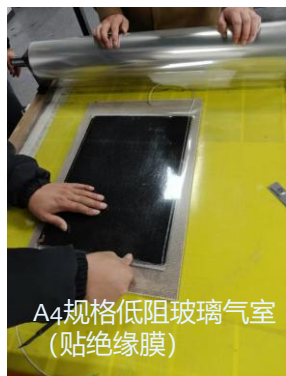
- 第一批次：幅面尺寸A3的低阻玻璃RPC（2套，损坏一套）
 - 完成对应幅面的感应条结构的设计制作。
 - 完成对应幅面的气室封边结构的设计制作。
 - 与前端放大器模块进行了适配，联合塑料闪烁体测试了宇宙线击中。
- 第二批次：5套幅面尺寸A3的低阻玻璃气室（25年6月底已完成气室组装）
 - 复用第一批次的感应条电极板和气室封边结构。
 - 与新一版读出电子学TDC联合调试。
 - 计划探测效率-噪声测试，优化工作电压点。
 - 计划实测饱和和计数率。
- 第三批次（计划）：幅面尺寸140*40，低阻玻璃玻璃物料已切割准备。



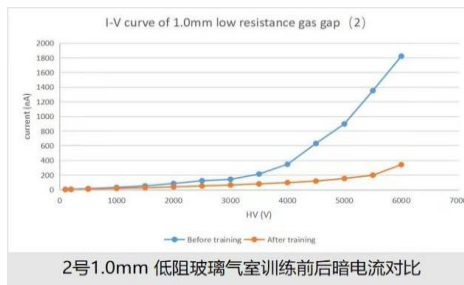
A4规格读出电极
(感应条)



A4规格读出电极
(背板)

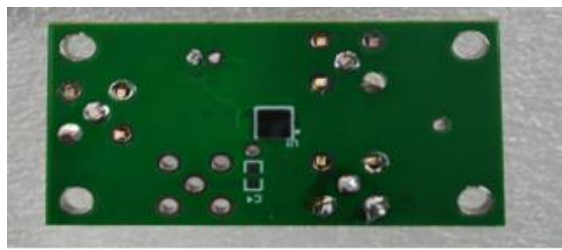


A4规格低阻玻璃气室
(贴绝缘膜)

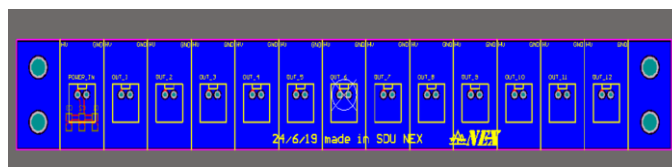


读出电子学

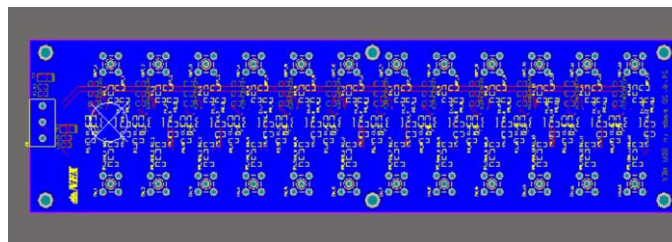
- 为塑闪探测器设计了多款SiPM适配板、前放板、定时电路、SiPM电源分发板以及数据读出板



SiPM适配板



1: 12电源分发板



12路放大器板



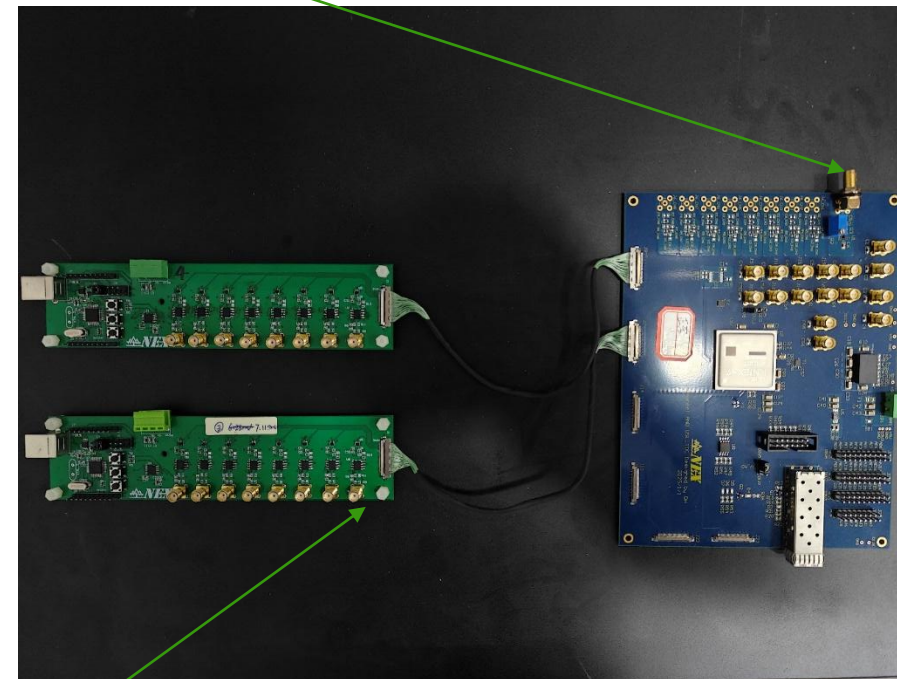
定时甄别板

兰大塑闪探测器实物图



START
STOP0
STOP1
STOP2
STOP3
STOP4
STOP5
STOP6
STOP7
STOP8
STOP9
STOP10
...
STOP14
STOP15

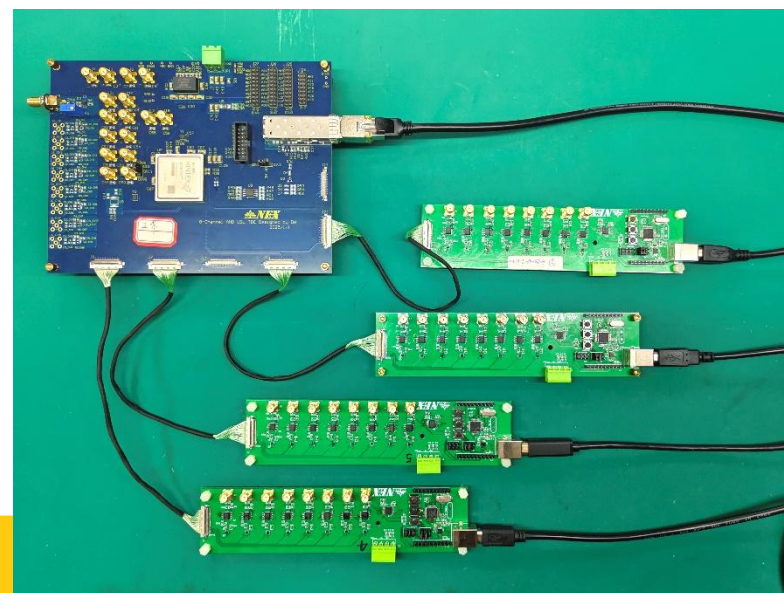
测试板实物图



基于FPGA的板级系统



32通道电子学测试现场



(1) 各个通道的效率 (以start通道以及stop14、 stop15做符合)

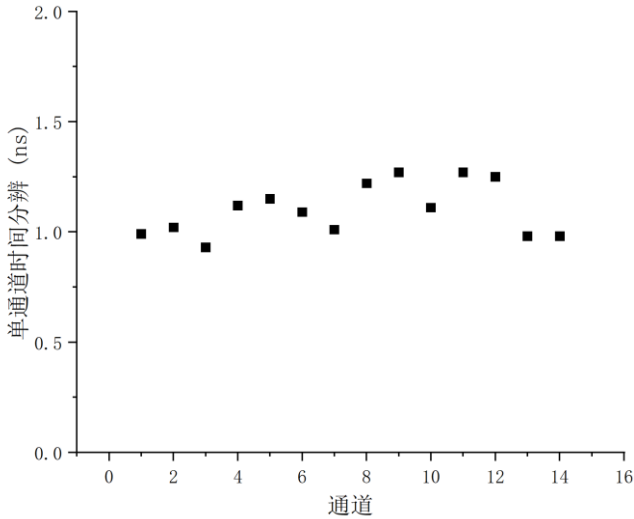
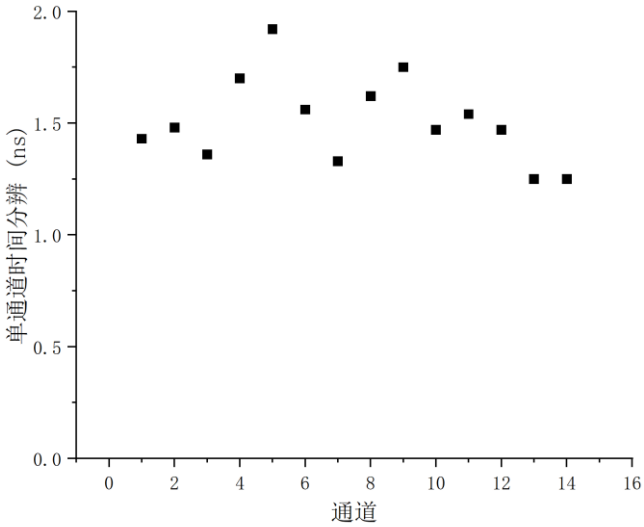
START阈值为35mV， 前端板STOP阈值为10mV

	STOP0	STOP1	STOP2	STOP3	STOP4	STOP5	STOP6	STOP7	STOP8	STOP9	STOP10	STOP11	STOP12	STOP13
效率	99.1%	98.4%	98.2%	97.8%	96.1%	98.1%	98.1%	98.1%	97.4%	98.1%	98.3%	98.5%	99.0%	99.3%

START阈值为35mV， 前端板STOP阈值为5mV

	STOP0	STOP1	STOP2	STOP3	STOP4	STOP5	STOP6	STOP7	STOP8	STOP9	STOP10	STOP11	STOP12	STOP13
效率	99.2%	98.9%	98.3%	98.1%	97.8%	98.5%	98.6%	98.3%	98.4%	98.6%	98.7%	95.8%	99.1%	99.4%

(2) 单通道时间分辨



读出电子学

- 研制了基于射频晶体管和跨阻放大器的多种前端电路，用于RPC信号读出和测试，并进行了现场实验，对信号配接放大、定时、串扰等进行了初步研究

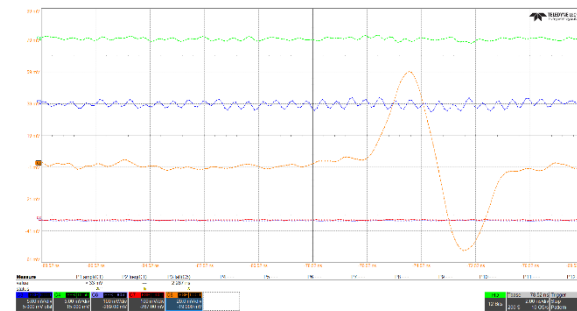
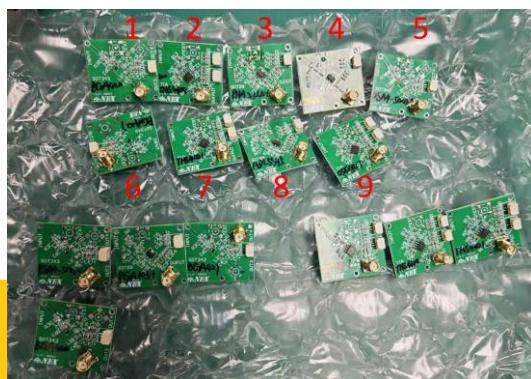
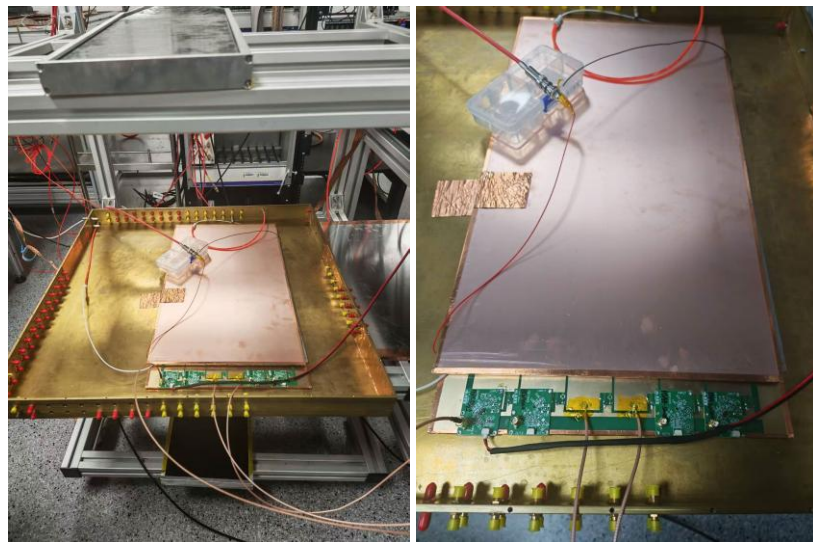
双端耦合电阻

GND

GND

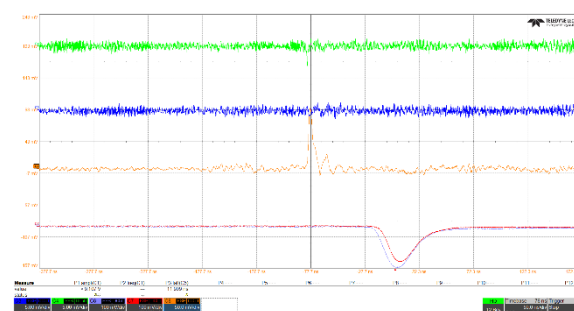
感应区

前放读出板（焊接）



射频放大器:

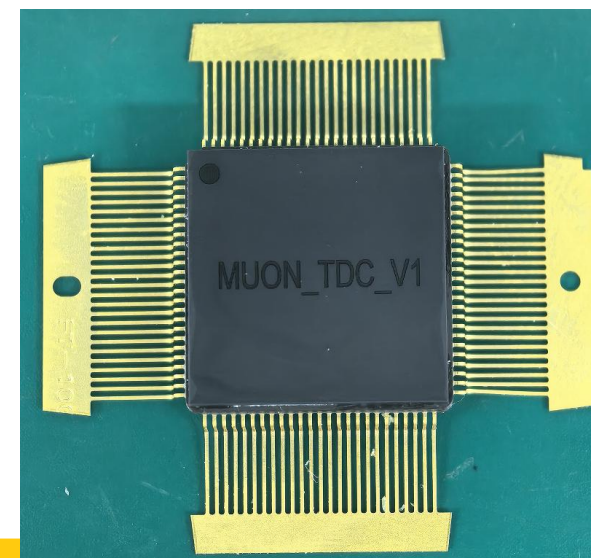
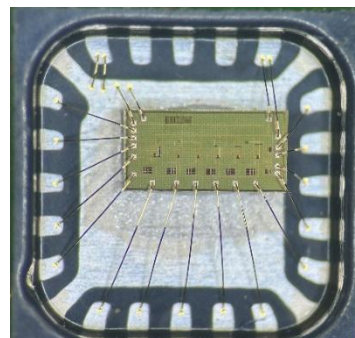
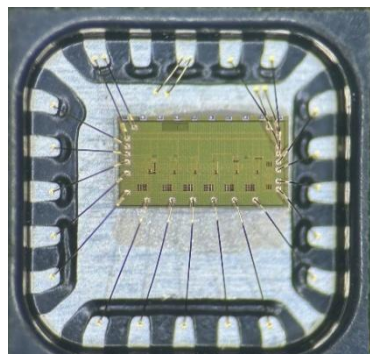
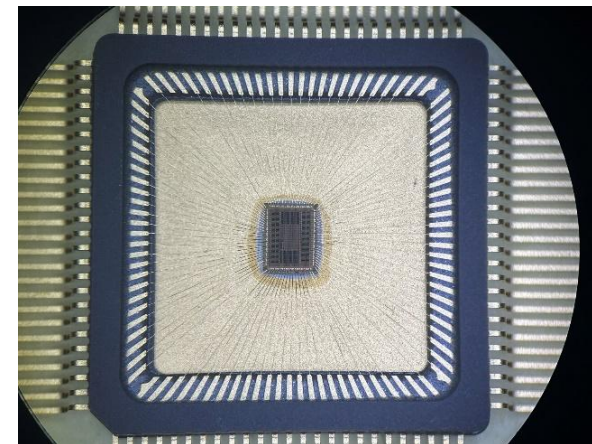
ADL5545 (60mV 1ns左右上升沿)



跨阻放大器:

OPA847(100mV,2ns上升沿)

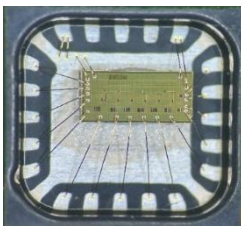
- 2024 年流片：前端（放大+成形+甄别）芯片，TDC芯片。
- 单通道前端放大定时ASIC：6种不同的配置
 - 针对40pF-160pF、300pF输入电容范围进行了优化
 - 固定增益、增益可配置



TDC

ASIC测试

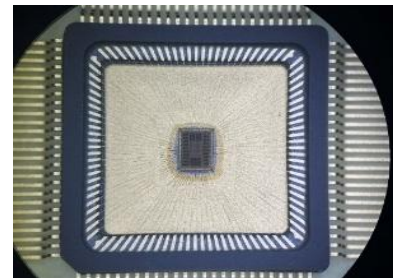
基本完成第一次流片测试



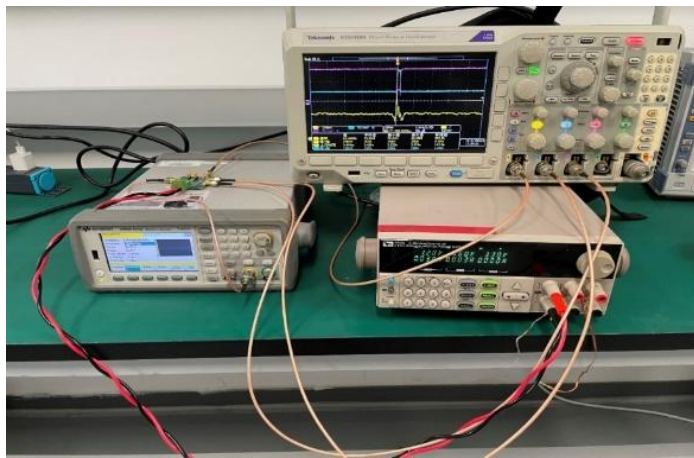
前端芯片绑线



芯片测试板



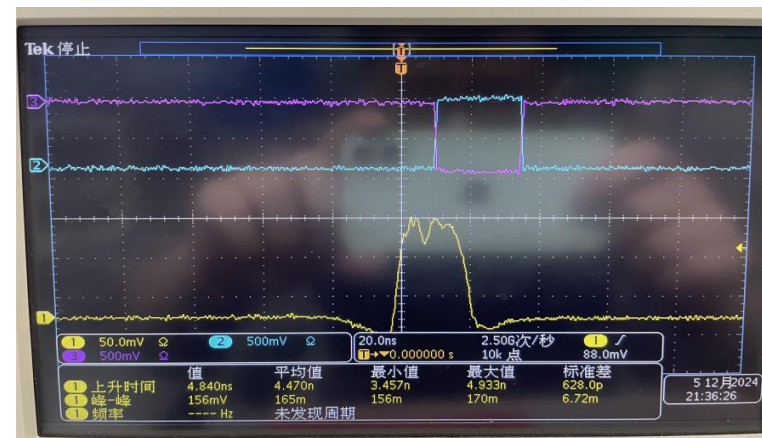
TDC绑线



前端芯片测试平台

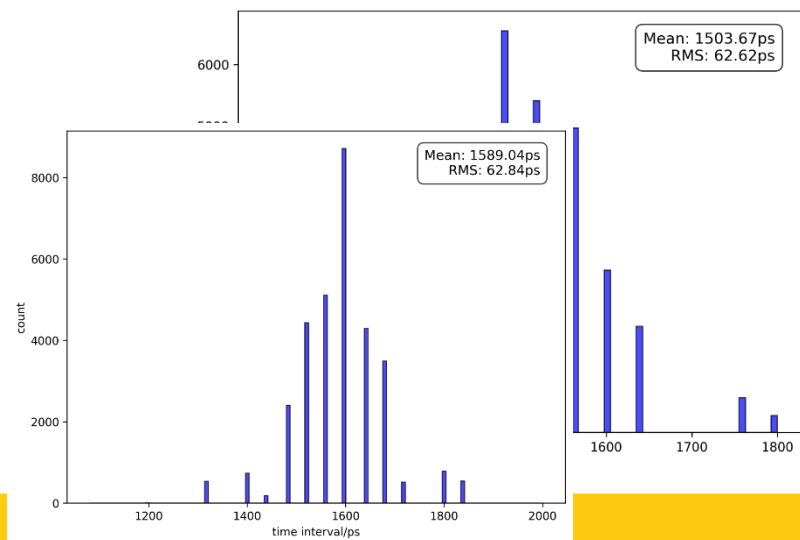
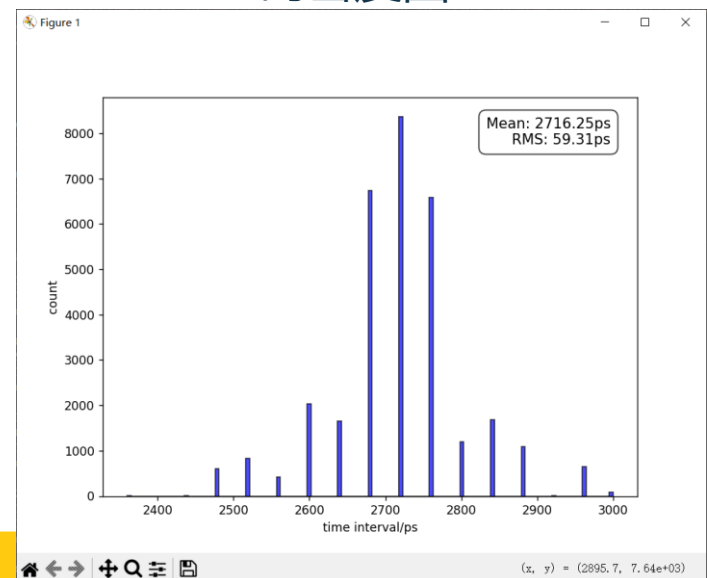
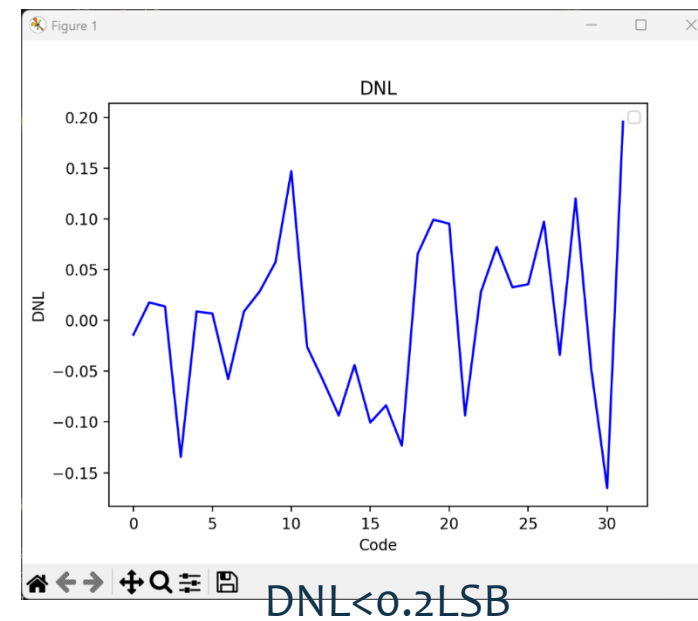
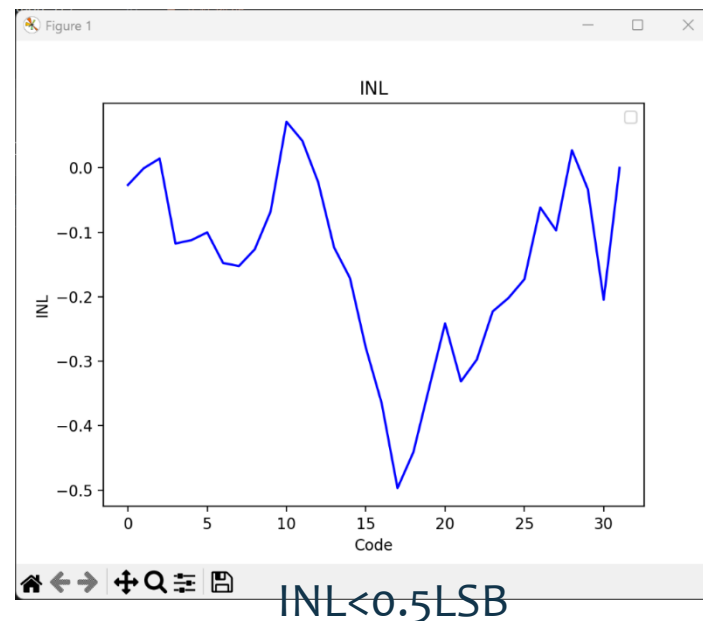
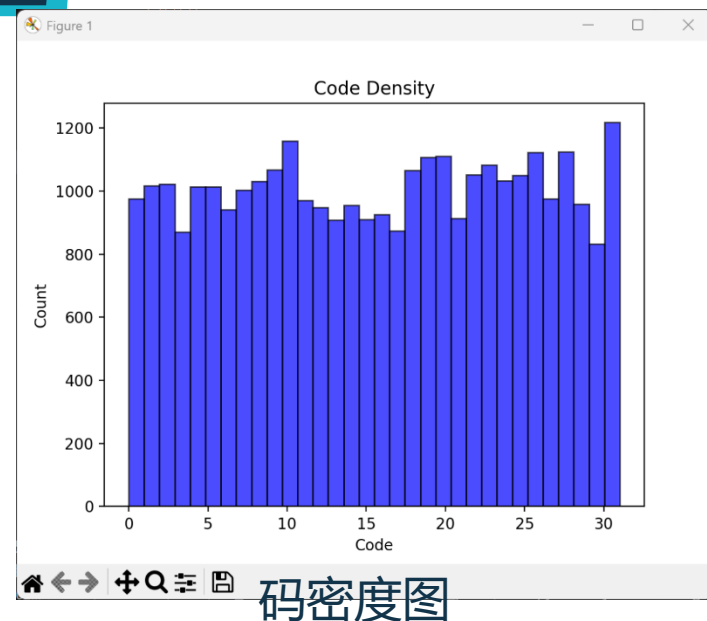


Kintex-7控制板及TDC测试板



模拟输出（下）及定时输出（上）

TDC芯片测试

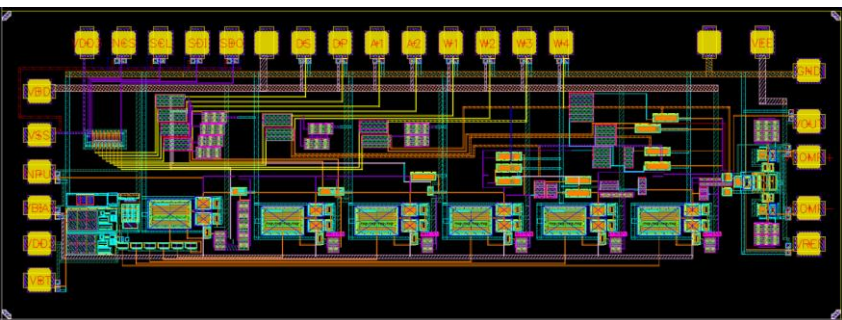


线延迟法测精度: 59ps

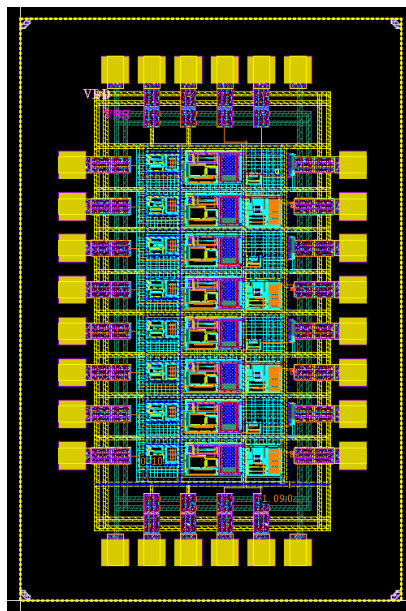
双通道信号源测精度: 62ps

TDC 芯片功耗: 约19.8mW

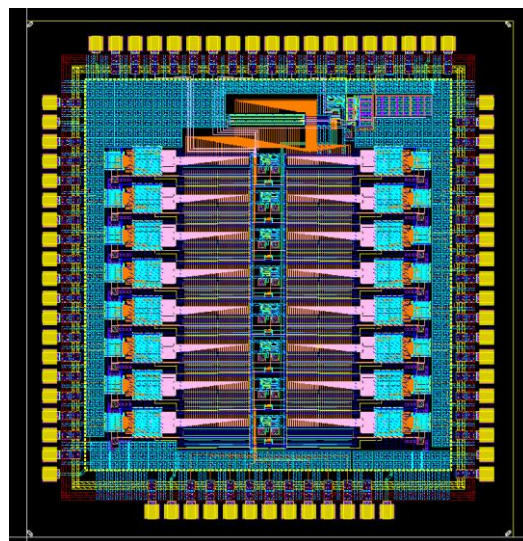
参加了25年6月工程流片



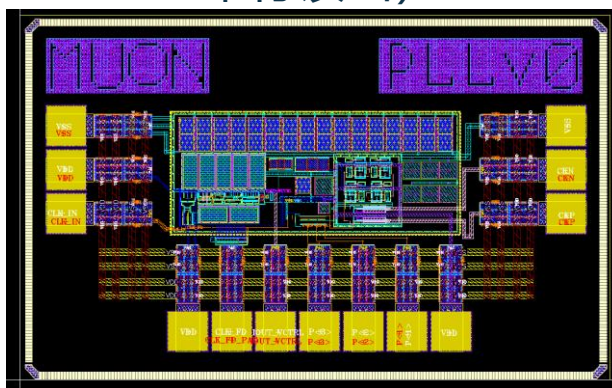
SiPM前端芯片 V2 (类VMM结构)



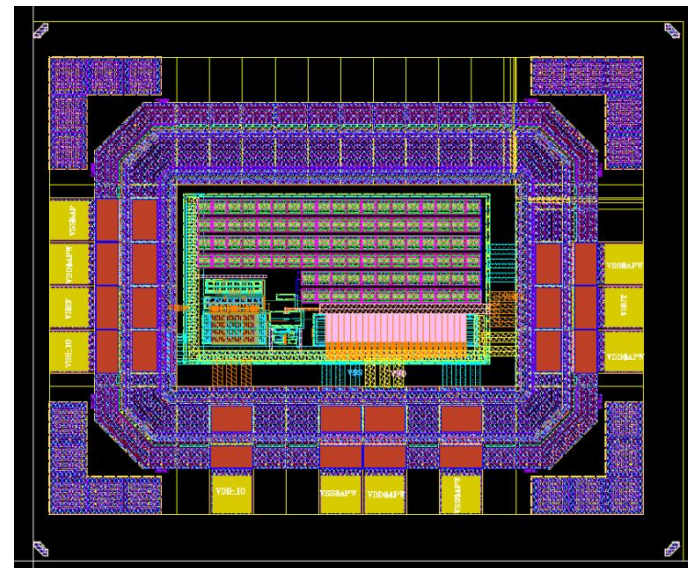
RPC前端芯片 (TIA+甄别器)



TDC V2 (8通道, 差分延迟链, 串行读出)



PLL: 为TDC提供外部时钟
(280-360MHz)



LDO: 1.2V@100mA

小结

- RPC探测器
 - 低阻玻璃RPC性能验证测试
 - 制作A2规格低阻玻璃RPC (40*140cm, 满足大面积、大尺寸要求)
- 塑闪探测器
 - 大面积平板探测器机械支撑结构研制
 - 目前0.5米*0.5米小型验证
 - 开展了长塑闪条的宇宙线测试
 - 规划验证~0.5米*2米尺寸的机械结构
- 电子学
 - 为两种探测器方案设计信号读出系统, 开展样机测试
 - ASIC第一版流片测试完成, 已优化设计提交第二次流片

谢谢各位专家！



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China